DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170474

金林雪, 李云鹏, 李丹, 闫伟兄, 吴向东. 气候变化背景下内蒙古马铃薯关键生长期气候适宜性分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170474
Jin L X, Li Y P, Li D, Yan W X, Wu X D. Suitability analysis of key potato growth stages in Inner Mongolia under climate change[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170474

气候变化背景下内蒙古马铃薯关键生长期气候适宜性分析*

金林雪, 李云鹏**, 李　丹, 闫伟兄, 吴向东
(内蒙古自治区生态与农业气象中心　呼和浩特　010050)

摘　要: 内蒙古是我国马铃薯主产区之一, 在气候变化背景下探讨马铃薯的区域适应性有重要的现实意义。依据内蒙古地区119个站点逐日气象观测数据, 采用气候适宜度评估模型, 分1961—1990年、1991—2015年2个气候年代对内蒙古马铃薯开花—可收期气候适宜度的空间特征及变化趋势进行分析, 结果表明: 1)1961—2015年内蒙古马铃薯开花—可收期综合气候适宜度为0.62, 气候条件总体优越, 且日照适宜度>温度适宜度>降水适宜度。2)从空间分布上看, 温度适宜度由西向东呈"低—高—中"的带状分布, 降水适宜度由西向东、由北向南递增, 日照适宜度西高东低; 综合光温水三要素影响, 阴山南北麓东段及大兴安岭南麓区为气候适宜度的高值区, 具有适宜生产马铃薯的气候资源优势。3)从年代变化上看, 1961—1990年, 综合气候适宜度除东部偏北及西部偏北呈微弱的下降, 总体呈增加的趋势; 1991—2015年大部地区综合适宜度由上升转为下降趋势。4)气候变化背景下, 1961—2015年内蒙古马铃薯开花—可收期气候适宜性以$0.004\ 0\cdot 10a^{-1}$的倾向率下降, 其中日照适宜度基本持平, 降水适宜度、气温适宜度呈不同程度的下降趋势, 对马铃薯生长发育不利。因此, 马铃薯开花—可收期应注意水热条件的管理, 研究结果可为马铃薯气候资源利用与管理提供参考。

关键词: 气候变化; 内蒙古; 马铃薯; 开花—可收期; 气候适宜性; 温度适宜度; 日照适宜度; 降水适宜度
中图分类号: S532　　**文献标识码:** A

Suitability analysis of key potato growth stages in Inner Mongolia under climate change*

JIN Linxue, LI Yunpeng**, LI Dan, YAN Weixiong, WU Xiangdong
(Center of Ecology and Agricultural Meteorology of Inner Mongolia, Hohhot 010050, China)

Abstract: Inner Mongolia is the main potato planting area in China. It is therefore of practical importance to explore regional suitability of potato in Inner Mongolia under climate change. Based on the climatic suitability model, this paper analyzed the space-time characteristics of climate suitability for potato cultivation in Inner Mongolia using daily meteorological data (average temperature, maximum temperature, minimum temperature, precipitation, sunshine hours, wind speed, relative humidity and atmospheric pressure) from 119 weather stations during the period 1961–2015. This period was divided into two sub-periods (1961–1990 and 1991–2015) to calculate the suitability of climate for potato critical growth period (from flowering to harvesting) and to analyze the spatial and temporal variations of potato climate suitability. The results showed that average climate suitability index of potato growth from flowering to harvesting in 1961–2015 was 0.62, confirming that climatic conditions were suitable for growing potato in Inner Mongolia. The suitability index of sunshine hours was highest and that of precipitation lowest. This further illuminated that light and heat conditions in the region were better than water condition, and water was the main limiting factor of potato cultivation in Inner Mongolia. From the spatial distribution, the trend in temperature suitability tracked a low-high-medium curve from west to east. The suitability of precipitation was better in the southeast than in the northwest. Also the suitability of sunshine hours was high in the west and low in the east. For the comprehensive suitability of climate based on the above three factors, high-value areas were distributed in the east of Yin Mountain and the south of Daxing'anling Mountain regions, while the low-value

* 内蒙古旱地作物脆弱性评价标准的建立及示范应用(GYHY201506016)和国内外作物产量气象预报专项资助
**通讯作者: 李云鹏, 主要从事卫星遥感与农业气象应用的研究。E-mail: lyp5230@163.com
金林雪, 主要从事农业气象方面的研究。E-mail: jinlinxue324@126.com
收稿日期: 2017-05-09　接受日期: 2017-05-24
* This study was supported by the Establishment and Application of Evaluation Criteria for Vulnerability of Dryland Crops in Inner Mongolia (GYHY201506016) and Meteorological Forecast of Crop Yield at Home and Abroad.
**Corresponding author, E-mail: lyp5230@163.com
Received May 9, 2017; accepted May 24, 2017

areas were in the west of Inner Mongolia. Then for the time scale, the paper analyzed the annual changes in climatic suitability. Most of the area showed an uptrend in climate suitability for 1961–1990, except the north-east and north-west of Inner Mongolia. However, there was a significant decline in climate suitability in most of Inner Mongolia during 1991–2015. For the investigated 55 years (1961–2015), there were different climatic trends/indexes in the growth period form flowering to harvesting of potato in different regions, driven by climate change in Inner Mongolia. The comprehensive climatic suitability increased little in the southeast of Yin Mountain, northwest of Yin Mountain, the Hetao Irrigation District and the Alxa League, while other regions showed a decreasing trend. In general, there was a decreasing trend in climate suitability for potato from flowering to harvesting in Inner Mongolia, which occurred at an average rate of 0.004–0·100 a^{-1}. The suitability of temperature and precipitation declined, while sunshine hour suitability basically flattened, which was not good for potato growth in the region. Therefore, there was the need to strengthen moisture and temperature managements during the period from flowering to harvesting of potato. The results of the study reflected the overall condition for the cultivation of potato in Inner Mongolia and also provided the necessary references for the efficient utilization of climatic factors.

Keywords: Climate change; Inner Mongolia; Potato; Flowering to harvesting; Climatic suitability; Temperature suitability; Sunshine hour suitability; Precipitation sutiability

内蒙古马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)种植面积和总产均居全国前列，作为我国马铃薯产业发展的优势省区，为适应国家种植业转方式、调结构及马铃薯主食化的发展需要，推进内蒙古马铃薯产业的大力发展意义重大。马铃薯喜冷凉气候，不耐高温，其产量高低及质量优劣与种植区的气候条件密切相关，故不同区域气候条件对其生长发育及产量形成的影响也不同。在全球气候变化背景下，内蒙古地区光、温、水等气象要素均发生了明显改变[1]，而农业生产是对气候变化响应最为敏感的领域之一[2]。内蒙古马铃薯主产区大部分位于农牧交错地带，生态环境脆弱，生长发育易受气象条件的影响。有学者研究发现，气候变化对农作物的影响受地域影响较大，在不同地区得到的结论截然相反[3-4]。因此，研究马铃薯的气候适宜性，不仅有助于加强对优势产区马铃薯的监测，也可为全国马铃薯气候变化影响评估提供参考。

国内外开展气候变化对作物的影响及其气候适宜度方面的研究已有多年的历史，研究成果也日趋丰富：代立芹等[5]分析了1981—2010年河北省冬小麦(*Triticum aestivum* L.)光温水气候适宜度的时空变化特征；任玉玉等[6]对河南省棉花(*Gossypium* spp.)气候适宜度进行了研究，得出气候适宜度呈下降的趋势，且适宜度的变化有明显的地域差异；姚小英等[7]研究发现1971—2008年玉米(*Zea mays* L.)全生育期温度、光照适宜度呈上升趋势，降水适宜度呈下降趋势；王连喜等[8]研究得出1971—2010年江苏省冬小麦的气候适宜度空间分布特征，且温度适宜度、降水适宜度和气候适宜度都呈弱增加趋势，而日照适宜度呈微弱减少的趋势。以往的研究对象多集中在玉米、小麦、水稻(*Oryza sativa*)、棉花等作物上[9-15]，但对于马铃薯生长气候适宜性的研究相对较少，而开花到可收期是马铃薯块茎膨大、营养积累的重要时期，生育期天数约占全生育期天数的一半，是马铃薯产量形成的关键时期，而且该时期一般在7—9月，对气象条件变化较敏感。为此，本文在ArcGIS技术支持下，构建内蒙古马铃薯关键生长期气候适宜度指数，分析该区域在气候变化背景下马铃薯气候适宜性的时空变化特征，为气候资源的合理利用、种植结构的调整布局提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

内蒙古自治区(97°12′~126°04′E, 37°24′~53°23′N)属于高纬度、高海拔地区，为温带大陆性气候；光能资源充沛，大部地区年日照时数都大于2 700 h，全年太阳辐射量从东北向西南递增；年总降水量50~450 mm，东北降水多，向西部递减；年平均气温为0~8 ℃。内蒙古大部分地区气候冷凉，日照充足，昼夜温差大，具有适宜马铃薯生产的气候环境。马铃薯在内蒙古各地均有种植，是该省分布最广、面积和产量比较稳定的农作物之一[16]。

1.2　数据处理

研究区1961—2015年气象数据来源于内蒙古地区119个自动气象站观测的平均气温(℃)、最高气温(℃)、最低气温(℃)、降水量(mm)、相对湿度(%)、日照时数(h)、风速($m \cdot s^{-1}$)、气压(hPa)等逐日数据。各站点马铃薯产量和种植面积资料来源于统计部门。农业区资料来源于内蒙古农业厅；马铃薯生育期资料来自内蒙古气象局提供的观测农气报表，各站点发育期按距马铃薯观测站点的地理位置远近确定(图1及表1)。马铃薯开花—可收期的三基点温度、作物系数等气象指标数据来源于相关文献[17-18]。利用Origin 9.1、Microsoft Excel 2013对气象数据进行运算分析并完成图表的绘制，采用ArcGIS 10.2制作研究区域图及气候适宜度的时空分布图。

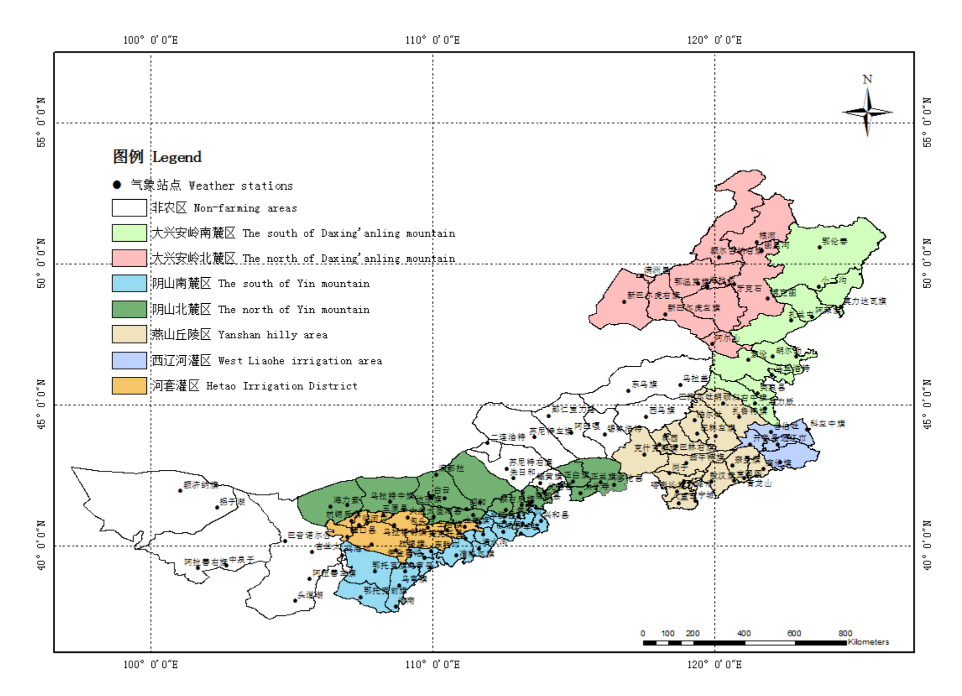


图 1　研究区域及气象站点分布

Fig. 1　Study area and the distribution of meteorological satations of Inner Mongolia

表 1　内蒙古地区 119 站及其对应的马铃薯开花—可收期时间

Table 1　Areas of 119 weather stations in Inner Mongolia and their corresponding periods from flowering to harvesting for potato

区域 Area	气象站 Meteorological station	开花期 Flowering	可收期 Harvesting
包头 Baotou City	满都拉、白云、达茂、固阳、昭和、包头市、土右 Mandula, Baiyun, Banner, Guyang, Zhaohe, Baotou, Right Tumete)	8 月上旬 Early August	9 月下旬 Late September
呼和浩特 Hohhot City	和林、清水河、托县 Helingeer, Qingshuihe, Togtoh Banner	7 月下旬 Late July	9 月中旬 Middle September
	武川、土左、呼市郊区、玉泉区 Wuchuan, Tumd Left Banner, Hohhot suburbs, Yuquan	7 月中旬 Middle July	9 月上旬 Early September
阿拉善盟 Alxa League	额济纳旗、拐子湖、巴音诺尔公、中泉子、阿右旗、头道湖、吉兰太、孪井滩、阿左旗 Ejina Banner, Guaizihu, Bayinnuo'ergong, Zhongquanzi, Alxa Right Banner, Toudaohu, Jilantai, Luanjingtan, Alxa Left Banner	7 月上旬 Early July	9 月下旬 Late September
巴彦淖尔 Bayannur City	海力素、乌拉特后旗、乌拉特中旗、五原、大佘太、磴口、杭锦后旗、乌拉特前旗、临河区 Hailisu, Urad Houqi, Urad Zhongqi, Wuyuan, Dashetai, Dengkou, Hanggin Rear Banner, Urad Qianqi, Linhe	7 月上旬 Early July	9 月下旬 Late September
鄂尔多斯 Ordos City	达拉特旗、伊克乌素、鄂托克旗、杭锦旗、东胜区、伊金霍洛、乌审召、准格尔旗、乌审旗、鄂托克前旗、河南 Dalad Banner, Yikewusu, Otog Banner, Hanggin Banner, Dongsheng, Ejin Horo, Uxin Ju, Jungar Banner, Uxin Banner, Otog Qianqi, Henan	7 月上旬 Early July	9 月下旬 Late September
乌海 Wuhai City	乌海 Wuhai	7 月上旬 Early July	9 月下旬 Late September
乌兰察布 Ulanqab City	商都、化德、察右后、兴和、察右前、丰镇 Shangdu, Huade, Chayouhouqi, Xinghe, Chayouqianqi, Fengzhen)	7 月中旬 Middle July	9 月中旬 Middle September
	察右中、四子王、集宁、卓资、凉城 Chayouzhongqi, Siziwang, Tsining, Zhuozi, Liangcheng	7 月下旬 Late July	9 月上旬 Early September
锡林郭勒 Xilingol League	乌拉盖、东乌旗、二连、那仁宝力格、阿巴嘎、苏左旗、苏右旗、朱日和、镶黄旗、西乌旗、锡林浩特、正白旗、正兰旗、多伦县、太仆寺 Wulagai, Dong Ujimqin Banner, Erenhot, Naran bulag, Abag banner, Sonid Left Banner, Sonid Right Banner, Zhurihe, Xianghuang Banner, Xi Ujimqin Banner, Xilin Hot, Plain White Banner, Zhenglan Banner, Duolun, Taipusi	7 月中旬 Middle July	9 月上旬 Early September
赤峰 Chifeng City	浩尔吐、巴林左旗、巴林右旗、林西、克什克腾旗、阿鲁科尔沁、翁牛特、岗子、赤峰市、敖汉旗、宝国图、喀喇沁旗、八里罕、宁城 Hao'ertu, Bairin Left Banner, Bairin Right Banner, Linxi, Hexigten Banner, Aluke'erqin, Ongniud, Gangzi, Chifeng, Aohan Banner, Baoguotu, Harqin Banner, Balihan, Ningcheng	7 月上旬 Early July	9 月中旬 Middle September
通辽 Tongliao City	霍林郭勒、巴雅尔吐胡、扎鲁特旗、舍伯吐、科左中旗、青龙山、开鲁县、通辽市、奈曼旗、科左后旗、库伦旗 Huolinguole, Bayar Tuhu, Jarud Banner, Shebotu, Horqin Left Wing	6 月下旬 Late June	8 月下旬 Late August

	Middle Banner, Qinglongshan, Kailu, Tongliao, Naiman Banner, Horqin Left Wing Rear Banner, Hure Banner)		
兴安盟 Hinggan League	阿尔山、胡尔勒、扎赉特、索伦、乌兰浩特、突泉、科右中旗、高力板 Arxan, Hu'erle, Jalaid Banner, Sauren, Ulan Hot, Tuquan, Horqin Right Wing Middle Banner, Gaoliban	7 月上旬 Early July	9 月中旬 Middle September
呼伦贝尔 Hulun Buir City	根河、图里河、鄂伦春、满洲里、陈旗、鄂温克、牙克石、海拉尔、小二沟、新右旗、新左旗、博克图、扎兰屯、莫力达瓦、阿荣旗 Genhe, Tulihe, Oroqen, Manzhouli, Chenqi, Ewenki, Yakeshi, Hailar, Xiao'ergou, Xin Barag Right Banner, Xin Barag Left Banner, Bugt, Zhalantun, Morin Dawa, Arun Banner)	7 月中旬 Middle July	9 月中旬 Middle September

1.3 研究方法

1.3.1 马铃薯温度适宜度

温度适宜度[19]用下式计算:

$$F_t = \frac{(t-t_l)\cdot(t_h-t)^B}{(t_0-t_l)\cdot(t_h-t_0)^B} \tag{1}$$

$$B = \frac{t_h-t_0}{t_0-t_l} \tag{2}$$

式中: F_t 为温度适宜度; t 为日平均气温; t_l、t_h、t_0 分别为马铃薯开花—可收期所需的下限温度、上限温度和适宜温度, 根据相关文献[17], 目前马铃薯所需的下限温度、上限温度和适宜温度分别为 2 ℃、30 ℃、18 ℃。

1.3.2 马铃薯日照适宜度

参考前人研究成果[20], 在计算马铃薯日照适宜度时把"天文日长"的 70%作为临界值, 即以 0.7 个天文日长(可照时数)作为临界光长, 实际日照时数大于此值, 即认为日照适宜度为 1, 小于此值, 用实际日照时数与 0.7 个天文日长的比值表示。

$$F_s = \begin{cases} \frac{s}{s_0} & (s < s_0) \\ 1 & (s \geq s_0) \end{cases} \tag{3}$$

式中: F_s 为日照适宜度, S 为实际日照时数(h), S_0 为某时段与马铃薯发育有关的 70%的可照时数(h)。

1.3.3 马铃薯降水适宜度[21]

$$F_r = \begin{cases} 1-\frac{|\Delta W|}{W} & (R < W) \\ 1 & (R \geq W) \end{cases} \tag{4}$$

$$\Delta W = R - W \tag{5}$$

$$W = Kc \times ET_0 \tag{6}$$

式中: F_r 为降水适宜度; $\triangle W$ 为农田水分盈亏值; R 为降水量; W 为作物理论需水量; Kc 为马铃薯作物系数, 参考前人研究成果[18], 马铃薯开花—可收期作物系数取 0.94; ET_0 为该时段潜在蒸散量, 用彭曼公式计算所得, 本文所用的彭曼公式参考毛飞等[22]的计算方法。

1.3.4 马铃薯气候适宜度

为了综合反映温度、降水、日照 3 个因素对马铃薯关键生长期适宜度的影响, 参考前人研究的基础上[23], 采用几何平均和综合乘积的方法, 构建了马铃薯开花—可收期气候适宜度动态模型 F, 计算公式为:

$$F = \sqrt[3]{(F_t \times F_s \times F_r)} \tag{7}$$

式中: F_t、F_s、F_r 分别为温度适宜度、日照适宜度、降水适宜度。

1.3.5 气候倾向率

本文利用气候倾向率分析气候适宜度的变化趋势。用 X_i 表示样本量为 n 的某气象变量, 用 t 表示 X_i 所对应的时间, 建立 X_i 与 t 之间的一元线性回归方程[24]:

$$X_i = at_i + b \tag{8}$$

式中: a 为回归系数, b 为常数项, a 和 b 用最小二乘法进行估计, 以 a 的 10 倍作为每 10 a 气候倾向率。

2 结果与分析

2.1 内蒙古马铃薯气候适宜度空间分布特征

2.1.1 气温适宜度空间分布

1961—2015 年间内蒙古马铃薯开花—可收期气温适宜度均在 0.70 以上, 温度适宜度比较高, 主要原因是 7 月内蒙古各地气温开始明显攀升, 关键生长期平均气温为 19 ℃左右, 接近马铃薯生长的最适宜温度 18 ℃。气温适宜度高值区主要分布在阴山南北麓、中部大部、燕山丘陵大部、大兴安岭南麓南段, 达 0.90 以上, 其中土右旗为最大值中心(0.94); 而阿拉善盟大部、呼伦贝尔市北部气温适宜度略偏低, 大部区域在 0.85 以下, 拐子胡为低值中心(0.72); 其余地区为中值区, 气温适宜度为 0.86~0.90(图 2a)。

2.1.2 降水适宜度空间分布

由降水适宜度分布图(图 2b)显示，全区降水适宜度为 0.05~0.55，波动幅度较大，且呈由西向东、由北向南逐渐升高的趋势，主要是由于该区年降水量数值的跨度很大，且各地降雨日数也存在很大差异，7—9 月东部大部降水日数达 35 d 以上，而西部区域为 20 d 以下。降水适宜度西部偏西地区低于 0.2，阴山南麓、阴山北麓东段及东部大部为高值区域，呼和浩特市清水河及和林达 0.5 以上，其余地区为中值区。

2.1.3 日照适宜度空间分布

由图 2c 可以看出，内蒙古地区马铃薯关键生长期的日照适宜性整体也较高，这是由于 7—9 月全区的平均日照时数为 789.4 h，日照条件总体充沛。日照适宜度大部地区维持在 0.88~0.95，低值区域主要分布在大兴安岭南麓区、阿尔山地区及西辽河灌区，为 0.80~0.87。

2.1.4 综合适宜度空间分布

由各自的单要素适宜度可以看出，中西部地区降水是影响马铃薯生长的限制因子，日照是东部地区马铃薯生长的重要影响因子。由于以上 3 个因素的共同影响和空间分布上的差异，决定了内蒙古马铃薯关键生长期气候适宜度空间分布格局(图 2d)。1961—2015 年，内蒙古马铃薯农业气候(光温水)资源总体比较适宜，综合气候适宜度平均值 0.62，基本能够满足马铃薯的生理需要；西部偏西地区偏低(0.30~0.50)；中西部偏南及东部大部综合气候适宜度均达 0.60 以上，具有适宜生产马铃薯的气候资源优势，其中大兴安岭南麓、燕山丘陵北部及西部、阴山南北麓东段为 0.65~0.76，气候综合条件更佳；其余区域为 0.51~0.60，为中值区。

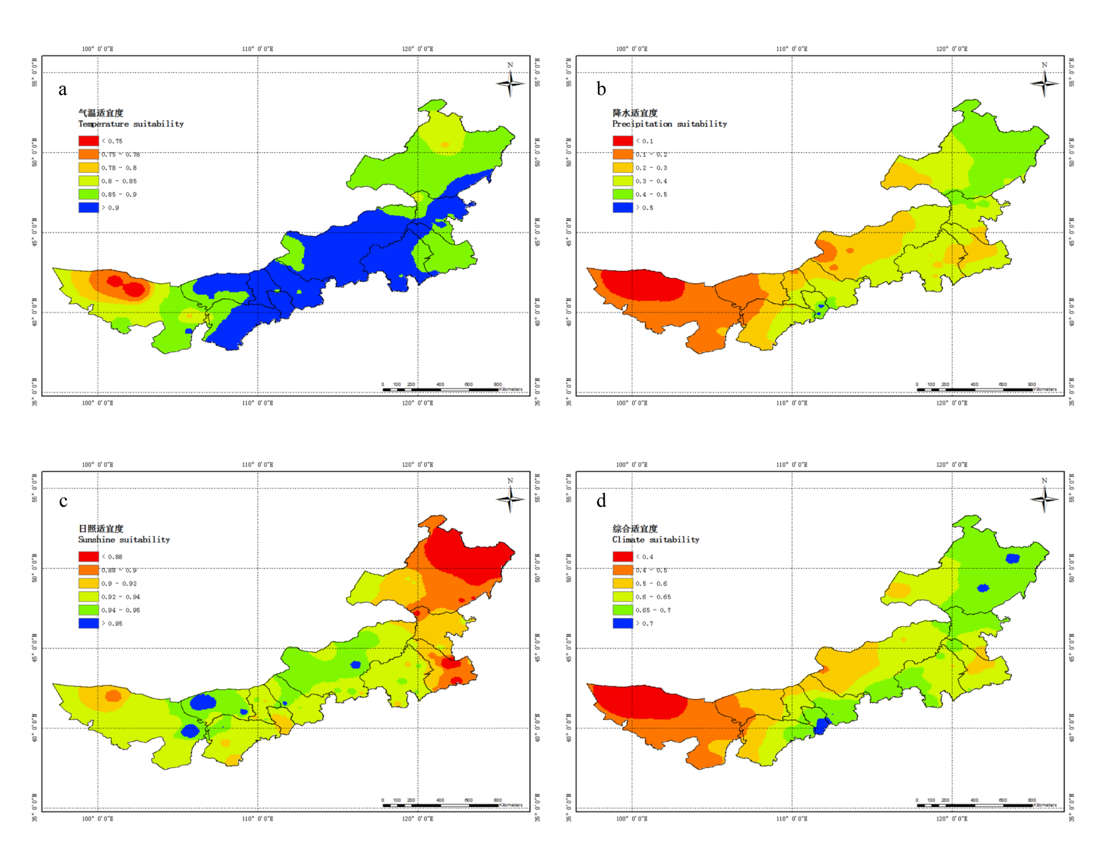


图 2 1961—2015 年内蒙古马铃薯开花—可收期气温适宜度(a)、降水适宜度(b)、日照适宜度(c)和综合气候适宜度(d)的空间分布图

Fig. 2 Spatial distributions of temperature suitability (a), precipitation suitability (b), sunshine suitability (c) and comprehensive climate suitability (d) for potato from flowering to harvesting in Inner Mongolia from 1961 to 2015

2.2 内蒙古马铃薯气候适宜度年代变化特征

2.2.1 气温适宜度年代变化

1961—1990 年间，温度适宜度的气候倾向率呼伦贝尔市北部、兴安盟南部、通辽市大部、赤峰市偏东及偏南、乌兰察布市及以西大部呈微弱的增加趋势，其他区域均呈弱的减少趋势，总体以倾向率为 0.002 8·$(10a)^{-1}$ 的趋势弱增长；1991—2015 年变化相对较平缓，大部地区温度适宜度为微弱的下降，气候倾向率为–0.002 2·$(10a)^{-1}$(图 3)。

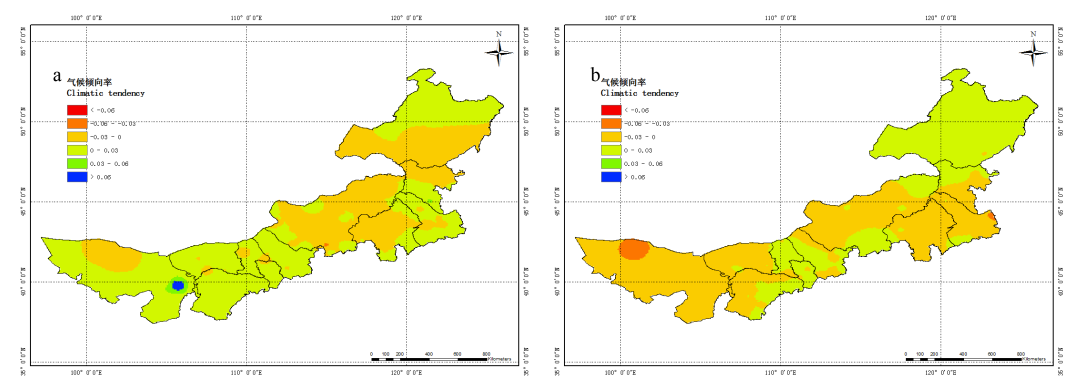


图 3　内蒙古马铃薯开花—可收期温度适宜度气候倾向率变化(a: 1961—1990 年; b: 1991—2015 年)

Fig. 3　Change trends of temperature suitability for potato from flowering to harvesting in Inner Mongolia (a: from 1961 to 1990; b: from 1991 to 2015)

2.2.2　降水适宜度年代变化

马铃薯降水适宜度变化幅度较大，前 30 年间气候倾向率为–0.065 4~0.136 3·(10a)$^{-1}$，其中大兴安岭南北麓、锡盟东部、阴山北麓中段、河套灌区大部呈上升趋势，其余区域呈下降趋势，总体的平均增长率为 0.005 7·(10a)$^{-1}$(图 4a); 1991—2015 年，大部地区表现为下降趋势(总体下降率为 0.010 8·(10a)$^{-1}$)，燕山丘陵大部下降趋势较明显，仅阴山南麓西段、河套灌区偏东及阴山北麓中段呈微弱的上升趋势(图 4b)。

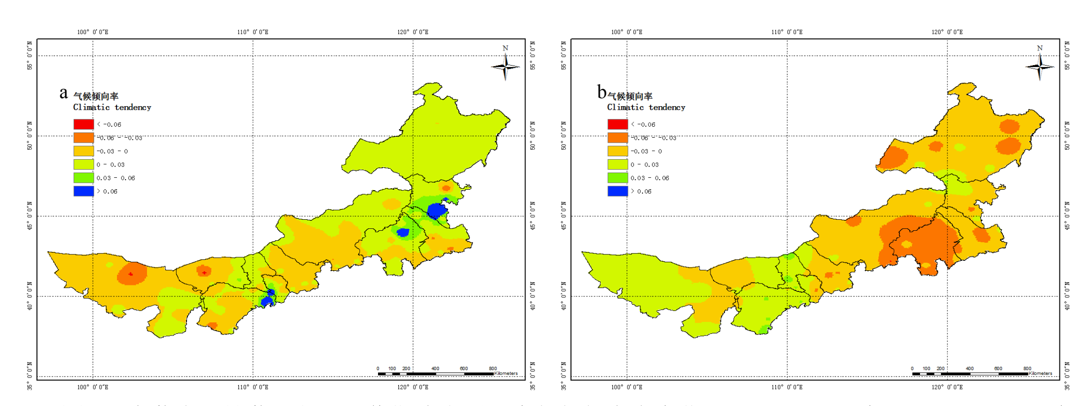


图 4　内蒙古马铃薯开花—可收期降水适宜度气候倾向率变化(a: 1961—1990 年; b: 1991—2015 年)

Fig. 4　Change trends of precipitation suitability for potato from flowering to harvesting in Inner Mongolia (a: from 1961 to 1990; b: from 1991 to 2015)

2.2.3　日照适宜度年代变化

日照适宜度 1961—1990 年间总体以倾向率为 0.007 8·(10a)$^{-1}$ 的趋势增长，呈西升东降的趋势分布；其中中西部及东部偏南部分地区呈不同程度的增加趋势，且由西向东增加幅度递减，而东部偏北地区呈现明显的下降趋势; 1991—2015 年，西辽河灌区南部、乌兰察布市及以西地区日照适宜度由上升转为下降趋势，呈微弱的减少趋势，其中包头市南部、呼和浩特市偏西及通辽市南部地区下降趋势较明显，东部大部适宜度由下降转为上升趋势，大兴安岭南北麓呈增加趋势的区域明显扩大，总体的气候倾向率为 0.005 2·(10a)$^{-1}$ (图 5)。

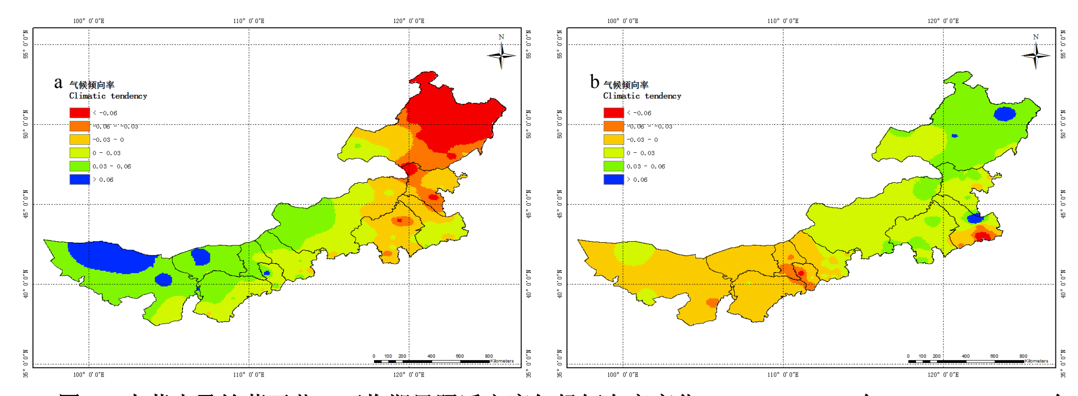


图 5　内蒙古马铃薯开花—可收期日照适宜度气候倾向率变化(a: 1961—1990 年; b: 1991—2015 年)

Fig. 5　Change trends of sunshine suitability for potato from flowering to harvesting in Inner Mongolia (a: from 1961 to 1990;

b: from 1991 to 2015)

2.2.4 综合适宜度年际变化

马铃薯综合气候适宜度前 30 年和后 30 年略有起伏，1961—1990 年，除大兴安岭南麓北段、西辽河灌区、燕山丘陵区西部、阿拉善北部、阴山北麓偏东及阴山南麓偏西南呈微弱的下降，其余地区均呈上升趋势，总体呈增加的趋势[平均增长率为 0.005 6·(10a)$^{-1}$]；1991—2015 年大部地区综合适宜度由上升转为下降趋势，平均下降率为 0.005 7·(10a)$^{-1}$，仅东部偏北大部、通辽市科左中旗、包头市、鄂尔多斯及巴彦淖尔市偏东地区呈微弱的上升(图 6)。

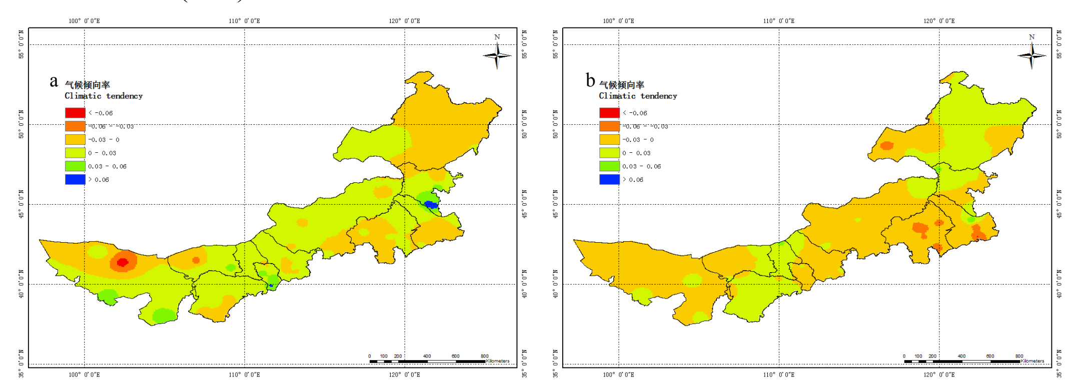


图 6　内蒙古马铃薯开花—可收期综合适宜度气候倾向率变化(a: 1961—1990 年; b: 1991—2015 年)

Fig. 6　Change trends of climate suitability for potato from flowering to harvesting in Inner Mongolia (a: from 1961 to 1990; b: from 1991 to 2015)

2.2.5 1961—2015 年气候适宜度时间变化特征

图 7 显示，1961—2015 年内蒙古马铃薯温度适宜度、日照适宜度均较高，分别在 0.85~0.93、0.84~0.96 之间波动，最大波幅分别为 0.08、0.12。降水适宜度均值(0.31)明显低于温度适宜度和日照适宜度，在 0.22~0.41 之间波动，波动幅度达 0.19；根据内蒙古地区近 30 年灾情资料分析，2002 年发生了大面积的干旱，2000 年、2007 年则发生严重干旱，对应年份的降水适宜度分别降至 0.228、0.225 和 0.216。综合气候适宜度在 0.55~0.69 之间波动，波动幅度为 0.14。上述结果表明，内蒙古地区光温资源较好，降水资源一定程度上限制马铃薯的生长。

近 55 年来，内蒙古地区马铃薯开花—可收期温度适宜度的线性倾向率为–0.024 6~0.013 6·(10a)$^{-1}$，东部偏南及西部区呈弱的减少趋势，其他区域均呈弱的上升趋势(图 8a)。降水适宜度的线性倾向率为–0.053 0~0.052 0·(10a)$^{-1}$，仅阴山南麓东段、阴山北麓中段、河套灌区东部及阿拉善大部呈弱的上升趋势，其他区域呈减少趋势(图 8b)。日照适宜度的线性倾向率为–0.048 0~0.035 8·(10a)$^{-1}$，大部区域呈弱的上升趋势，偏南及大兴安岭南麓区呈减少趋势(图 8c)。气候适宜度的线性倾向率为–0.029 5~0.026 9·(10a)$^{-1}$，除阴山南麓东段、阴山北麓中西段、河套灌区及阿拉善地区呈弱的上升趋势，其他区域呈弱的减少趋势(图 8d)。总体来看，内蒙古地区的马铃薯气候适宜度呈弱减少趋势，其中日照适宜度略微增加，气温适宜度微弱下降，降水适宜度有所减弱；且根据前后 30 年的分析发现，综合适宜的变化特征与降水适宜度的变化特征相似，说明随着时间的推移，降水对内蒙古地区马铃薯关键生长期的影响会越来越大。

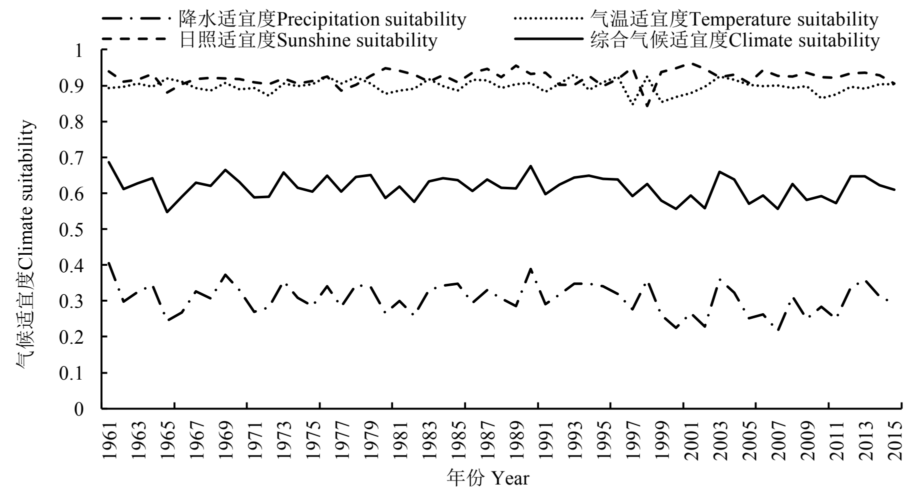


图 7　内蒙古地区马铃薯开花—可收期气候适宜度年际变化

Fig. 7 Interannual variability of climate suitability for potato from flowing to harvesting in Inner Mongolia

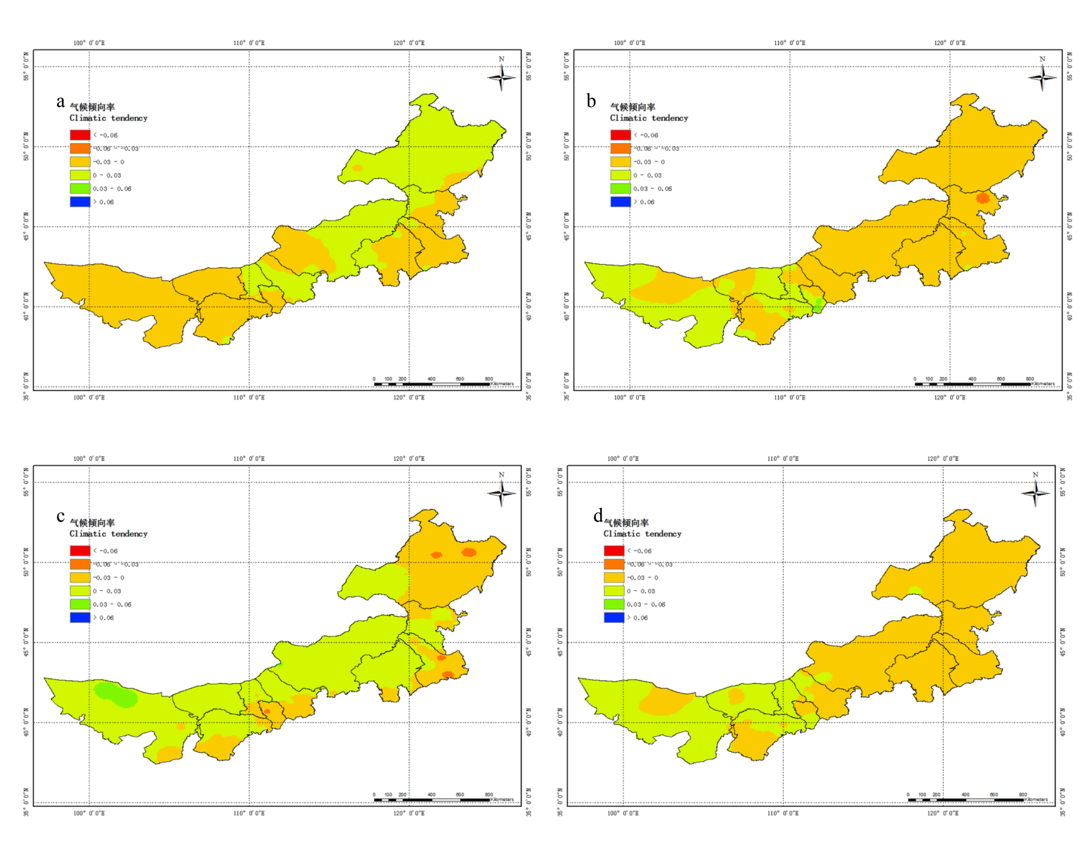


图 8 1961—2015 年内蒙古马铃薯开花—可收期气温适宜度(a)、降水适宜度(b)、日照适宜度(c)和综合气候适宜度(d)的变化特征图

Fig. 8 Change trends of climate suitability of temperature suitability (a), precipitation suitability (b), sunshine suitability (c) and comprehensive climate suitability (d) for potato from flowering to harvesting in Inner Mongolia from 1961 to 2015

3 结论与讨论

3.1 结论

1)气候变化背景下，内蒙古地区 1961—2015 年马铃薯关键生长期气候适宜度在空间分布上的特征为:温度适宜度由西向东大体呈“低—高—中”的带状分布，降水适宜度由西向东、由北向南呈递增的趋势，日照适宜度呈西高东低的特征；综合气候适宜度分布特征由以上三要素共同影响，阴山南北麓东段及大兴安岭南麓区综合气候适宜度均达 0.60 以上，具有适宜生产马铃薯的气候资源优势，而西部偏西地区最低，其余区域为中值区。

2)内蒙古地区马铃薯关键生长期综合气候适宜度为 0.62，说明内蒙古总体气候条件比较优越，适宜于马铃薯的种植和生长；日照适宜度高于温度适宜度，温度适宜度高于降水适宜度，进一步说明在马铃薯生长过程中，光热条件优于水分条件，水分条件是主要的限制因子。

3)在时间尺度上，马铃薯综合气候适宜度前 30 年和后 30 年略有起伏, 1961—1990 年，除大兴安岭南麓北段、西辽河灌区、燕山丘陵区西部、阿拉善北部、阴山北麓偏东及阴山南麓偏西南呈微弱的下降，总体呈增加的趋势；1991—2015 年大部地区综合适宜度由上升转为下降趋势，平均下降率为 0.005 7·$(10a)^{-1}$，仅东部偏北大部、通辽市科左中旗包头市、鄂尔多斯及巴彦淖尔市偏东地区呈微弱的上升。根据各个年代的分析发现，综合适宜度的年代变化特征与降水适宜度的年代变化特征相似，说明随着时间的推移，降水对内蒙古马铃薯关键生长期的影响会越来越大。

4)1961—2015 年，气候变化背景下内蒙古地区马铃薯关键生长期气候适宜度不同区域、不同要素的变化趋势不一致，阴山南麓东段、阴山北麓中西段、河套灌区及阿拉善地区有小幅增加，而其他区域呈降低趋势；日照适宜度呈微弱的增加趋势，降水适宜度、气温适宜度则呈不同程度的下降趋势。总体而言，气候变化对内蒙古马铃薯开花可收期的气候适宜性影响为弱的负效应，对马铃薯生长发育不利。

3.2 讨论

内蒙古地区幅员辽阔，从东到西地貌及气候条件复杂多样，本文基于气候适宜度指数分析了 1961—2015 年内蒙古地区马铃薯气候适宜度的时空分布特征，发现马铃薯气候适宜度存在着明显的地域差

异，其中阴山南北麓东段及东部大兴安岭南麓区处于高值区(0.61~0.76)，这是由于精细的田间管理，使得产业优势明显[25]；西辽河平原灌溉条件良好，大兴安岭北麓农区降水较多，但光温稍欠，气候适宜度略低于优势产区(0.51~0.60)；而河套灌区、土默川平原气候适宜度相比其他区域较低(0.31~0.50)。通过与全国马铃薯优势产区对比分析，内蒙古当前的马铃薯种植分布在中、高气候适宜值区域，说明评价的方法能从一定程度上体现关键生长期的马铃薯气候适宜度分布情况与实际种植情况相符。从时间尺度上看，1961—2015年内蒙古地区马铃薯开花—可收期综合气候适宜度总体呈弱的下降趋势，这与熊伟等[26-27]的研究结果相一致。这是由于1961—2015年间内蒙古地区的年降水量整体呈增加趋势，年日照时数呈微弱的减少趋势；年平均气温整体呈增温趋势，从20世纪90年代中后期后增温趋势尤为明显，而冬季的寒冷日数趋于减少，夏季的高温日数趋于增多，其中1996—2009年的14年间，有12年年平均气温呈偏暖状态。相关研究表明，温度升高对马铃著生长的负效应显著[28]，增温会导致蒸发量增加，加剧当地的干旱程度[29-30]，进而使降水适宜度、气温适宜度呈不同程度下降趋势，影响马铃薯关键生长期光温水的匹配及综合适宜度降低，抑制马铃薯正常生长发育。为此，需加强马铃薯开花—可收期的抗高温技术措施及田间水分条件的精准管理。

气候变化背景下，作物生长发育过程将有一定的变化[31]。本文从温度、降水、日照及其综合要素的气候适宜指标来评价分析马铃薯种植的区域适宜性，并且在时间尺度上分2个时段详细分析马铃薯关键生长期的适宜度变化特征，对了解内蒙古地区马铃薯的区域适应性有重要意义和应用价值，可为提高马铃薯关键期水热管理及其合理种植提供理论依据，对内蒙古马铃薯进行客观有效的实际生产有较强的参考价值。马铃薯的生长受多方面包括土壤条件、地势地形、品种特质及病虫害等因素的影响，且在不同生长期，不同气象要素均会产生不同的影响，需要在今后的工作中进行更深入、更细致的研究，以进一步完善适宜度的实际表征能力。

参考文献 References

[1] 秦大河. 进入21世纪的气候变化科学——气候变化的事实、影响与对策[J]. 科技导报, 2004, (7): 4–7
Qin D H. Climate change sciences into the 21st century: Facts, impact and strategies addressing climate change[J]. Science & Technology Review, 2004, (7): 4–7
[2] 孙芳. 我国主要作物对气候变化的敏感性和脆弱性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005: 12–15
Sun F. Study on the sensitivity and vulnerability of main crops to climate change in China[D]. Beijing: The Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005: 12–15
[3] Peiris D R, Crawford J W, Grashoff C, et al. A simulation study of crop growth and development under climate change[J].Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 79(4): 271–287
[4] Rosenzweig C, Phillips J, Goldberg R, et al. Potential impacts of climate change on citrus and potato production in the US[J]. Agricultural Systems, 1996, 52(4): 455–479
[5] 代立芹, 李春强, 魏瑞江, 等. 河北省冬小麦气候适宜度及其时空变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(3): 399–406
Dai L Q, Li C Q, Wei R J, et al. Climatic suitability of winter wheat and its spatial-temporal changes in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(3): 399–406
[6] 任玉玉, 千怀遂. 河南省棉花气候适宜度变化趋势分析[J]. 应用气象学报, 2006, 17(1): 87–93
Ren Y Y, Qian H S. Climatic suitability of cotton and its changes in Henan Province[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(1): 87–93
[7] 姚小英, 蒲金涌, 姚茹莘, 等. 气候暖干化背景下甘肃旱作区玉米气候适宜性变化[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 59–67
Yao X Y, Pu J Y, Yao R X, et al. Variation of climate suitability of maize in arid area in Gansu under the condition of climate dry–warming[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 59–67
[8] 王连喜, 顾嘉熠, 李琪. 江苏省冬小麦适宜度时空变化研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 67–75
Wang L X, Gu J Y, Li Q. Study on the temporal and spatial variation of winter wheat suitability in Jiangsu Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1): 67–75
[9] Hijmans R J. The effect of climate change on global potato production[J]. American Journal of Potato Research, 2003, 80(4): 271–279
[10] 宋秋洪, 千怀遂, 俞芬, 等. 全球气候变化下淮河流域冬小麦气候适宜性评价[J]. 自然资源学报, 2009, 24(5): 890–897
Song Q H, Qian H S, Yu F, et al. The evaluation of climatic suitability of winter wheat in the Huaihe River basin under climatic change regime[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(5): 890–897
[11] 黄淑娥, 田俊, 吴慧峻. 江西省双季水稻生长季气候适宜度评价分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 527–533
Huang S E, Tian J, Wu H J. Evaluation on climatic suitability during growth season of double rice in Jiangxi Province[J].

Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 527–533
[12] Lobell D B, Sibley A, Ortiz-Monasterio J I. Extreme heat effects on wheat senescence in India[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(3): 186–189
[13] Lobell D B, Schlenker W, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980[J]. Science, 2011, 333(6042): 616–620
[14] 徐玲玲, 吕厚荃, 方利. 气候变化对黄淮海地区夏玉米气候适宜度的影响[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 782–787
Xu L L, Lü H Q, Fang L. Effect of climate change on the climate suitability of summer maize on the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Resources Science, 2014, 36(4): 782–787
[15] 申双和, 褚荣浩, 吕厚荃, 等. 气候变化情景下黄淮海冬麦区降水量及其适宜度变化分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(4): 454–464
Shen S H, Chu R H, Lü H Q, et al. Precipitation variation and its suitability for winter wheat in Huang-Huai-Hai region under climate change[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(4): 454–464
[16] 刘玲. 内蒙古马铃薯产业化问题研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2003: 8–15
Liu L. Studies on industrialization of potato in Inner Mongolia Autonomous Region[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2003: 8–15
[17] 王彦平, 候琼, 宋卫士, 等. 气候适宜度在内蒙古东北部马铃薯发育期预报中的应用[J]. 中国农学通报, 2015, 31(3): 216–220
Wang Y P, Hou Q, Song W S, et al. The development period prediction of potato based on climate suitability in the northeastern Inner Mongolia[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(3): 216–220
[18] 连彩云, 马忠明, 吕晓东, 等. 河西绿洲灌区主要作物需水量及作物系数试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2012,31(5): 136–139
Lian C Y, Ma Z M, Lü X D, et al. Research on main crops water requirement and crop coefficient in oasis irrigation region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(5): 136–139
[19] 马树庆. 吉林省农业气候研究[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 33–34
Ma S Q. Agricultural Climate Study of Jilin Province[M]. Beijing: China Meteorology Press, 1994: 33–34
[20] 黄璜. 中国红黄壤地区作物生产的气候生态适应性研究[J]. 自然资源学报, 1996, 11(4): 340–346
Huang H. A study on the climatic ecology adaptability of the crop production in the red and yellow soils region of China[J]. Journal of Natural Resources, 1996, 11(4): 340–346
[21] 李树岩, 彭记永, 刘荣花. 基于气候适宜度的河南夏玉米发育期预报模型[J]. 中国农业气象, 2013, 34(5): 576–581
Li S Y, Peng J Y, Liu R H. Prediction model of summer maize developmental stages based on climatic suitability in Henan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(5): 576–581
[22] 毛飞, 张光智, 徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较[J]. 应用气象学报, 2000, 11(S1): 128–136
Mao F, Zhang G Z, Xu X D. Several methods of calculating the reference evapotranspiration and comparison of their results[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2000, 11(S1): 128–136
[23] 侯英雨, 张艳红, 王良宇, 等. 东北地区春玉米气候适宜度模型[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3207–3212
Hou Y Y, Zhang Y H, Wang L Y, et al. Climatic suitability model for spring maize in northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(11): 3207–3212
[24] 张彩霞, 肖金香, 叶清, 等. 1951—2010 年南方晚稻气候适宜度时空变化特征分析[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(4): 792–804
Zhang C X, Xiao J X, Ye Q, et al. Variation characteristics of climate suitability for late rice in southern China from 1951 to 2010[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2016, 38(4): 792–804
[25] 内蒙古自治区农牧业厅. 内蒙古自治区推进马铃薯产业发展的指导意见[EB/OL]. 内蒙古自治区农牧业厅[2016-05-30]. http://www.nmagri.gov.cn/zxq/xztz/572550.shtml
Agriculture and Animal Husbandry Department of Inner Mongolia Autonomous Region. Guiding opinions on promoting potato industry development in the Inner Mongolia Autonomous Region[EB/OL]. [2016-05-30]. http://www.nmagri.gov.cn/zxq/xztz/ 572550.shtml
[26] 冶明珠, 郭建平, 袁彬, 等. 气候变化背景下东北地区热量资源及玉米温度适宜度[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2786–2794
Ye M Z, Guo J P, Yuan B, et al. Thermal resources and maize temperature suitability in Northeast China under climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(10): 2786–2794
[27] 熊伟, 杨婕, 林而达, 等. 未来不同气候变化情景下我国玉米产量的初步预测[J]. 地球科学进展, 2008, 23(10): 1092–1101

Xiong W, Yang J, Lin E D, et al. The projection of maize yield in china under climate change scenarios[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(10): 1092–1101

[28] Fleisher D H, Timlin D J, Reddy V R. Temperature influence on potato leaf and branch distribution and on canopy photosynthetic rate[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(6): 1442–1452

[29] 姚玉璧, 张秀云, 卢汉威, 等. 气象条件对西北温凉半湿润区马铃薯块茎形成及产量的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(2): 208–211

Yao Y B, Zhang X Y, Lu H W, et al. Influence of meteorological conditions on potato tuber formation and yield in temperate and cool semi–humid regions of Northwest China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(2): 208–211

[30] 姚玉璧, 王润元, 邓振镛, 等. 黄土高原半干旱区气候变化及其对马铃薯生长发育的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 379–385

Yao Y B, Wang R Y, Deng Z Y, et al. Effects of climate change on potato growth in semi–arid region of Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2): 379–385

[31] 王春玲. 气候变化对西北半干旱地区马铃薯生产影响的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015: 22–26

Wang C L. Impacts of climate change on potato production in the Northwest semi–arid region[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015: 22–26